

Ensayo para calcular tensiones y deformaciones en la estructura del techo de un silo metálico de 18,34 m de diámetro

Á. Ramírez-Gómez¹, E. Gallego¹, J.M. Fuentes¹, C. González-Montellano², C.J. Porras³ y F. Ayuga¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid, Grupo de Investigación EIPIRMA, ETSI Agrónomos, Ciudad Universitaria s/n, Madrid 28040, e-mail: alvaro.ramirez@upm.es

² Westeel Emea S.L., Avda. Europa 34 D, 2º A, 28023 Aravaca (Madrid), e-mail: cmontellano@westeel.com

³ Universidad Politécnica de Madrid, Dpto. Ingeniería Rural, ETSI Agrónomos, Ciudad Universitaria s/n, Madrid 28040

Resumen

Los silos metálicos requieren la disposición de una estructura en su parte superior para permitir la fijación de las chapas que forman la cubierta del silo y así soportar las cargas para las que ha sido diseñada. Esta estructura está formada por un sistema reticular de vigas radiales y circunferenciales que desempeñan diversas funciones. Los modelos de cálculo que se emplean asumen la existencia de ciertos supuestos de comportamiento que luego deben verificarse en la práctica. Por esta razón, se diseñó un experimento para obtener las tensiones y desplazamientos verticales producidos en distintos elementos de la estructura del techo de un silo de 18,34 m de diámetro, con objeto de validar los resultados proporcionados por modelos de cálculo numérico. La instrumentación de un silo de estas dimensiones resulta bastante compleja, y requiere tener en cuenta numerosos factores como la selección representativa de los puntos de carga aplicados sobre el techo, la comprobación de las cargas transmitidas o la instalación de los dispositivos adecuados para poder registrar las mediciones necesarias.

En los distintos ensayos realizados llegaron a aplicarse simultáneamente cargas sobre la estructura hasta en 54 puntos, mediante el uso de cintas tensoras (eslingas). La comprobación de la carga aplicada se realizó con el uso de 8 dinamómetros. Por otro lado, los desplazamientos verticales sufridos por la estructura, sometida a carga, se comprobaron en 3 puntos alineados con el uso de flexímetros ASM tipo A-WS10-100-R1K-L10, y las tensiones se infirieron a partir de las deformaciones registradas mediante el uso de 8 galgas extensométricas en 4 vigas opuestas de la estructura. Las lecturas procedentes de las galgas extensométricas y de los flexímetros fueron registrados mediante el uso de dataloggers. Los resultados obtenidos con los ensayos fueron comparados con los obtenidos con un programa de cálculo de estructuras mediante el cual se realizó un modelo tridimensional de la estructura. Se observó una buena concordancia en los resultados, siempre que se cumplieran las hipótesis de partida del modelo. El ensayo permitió detectar la presencia de ciertas anomalías en el funcionamiento de algunos elementos del silo, que fueron corroboradas con los modelos de cálculo.

Palabras clave: Ensayo, techo, silo, tensiones, deformaciones

Tests for the determination of strains and stresses in the roof structure of a silo 18.34 m in diameter

Abstract

Steel silos need a structure to assemble the sheets that forms the silo roof. This structure is made of radial and circumferential beams that form a reticulated network and accomplish different functions. On the other hand, numerical models developed to analyse the mechanical behaviour of the elements in the roof structure assume several hypothesis that have to be experimentally checked. This is the reason why an experimental setup was designed in order to obtain the strains and stresses in different components of the roof structure of a silo 18.34 m in diameter. The experimental results were compared to those obtained by the numerical models.

The instrumentation of large silos is very complex, and it requires taking into account many factors, e.g., a selection of the places for load application, the verification of the magnitude of the loads applied or the use of adequate equipment for measuring. Different tests were carried out in the roof structure, and loads were applied

by using slings at 54 different places. The magnitude of the loads was registered by using 8 dynamometers. On the other hand, the vertical displacements of the loaded structure were measured in 3 different places by using ASM cable actuated position sensors model A-WS10-100-R1K-L10, and stresses were calculated from the measurements of 8 strain gauges placed in 4 radial beams of the roof structure. The results of the experimental tests were compared to those obtained with a numerical model. It was observed a good agreement between both sets of results, if the initial hypothesis of the model were right. The experiments detected some malfunctions in elements of the roof structure, which were also verified with the numerical models.

Keywords: Tests, roof, silo, stresses, strains

1. Introducción

Los silos constituyen una tipología estructural que ha sido ampliamente empleada en las industrias y explotaciones agrarias para el almacenamiento de materias primas desde finales del siglo XIX. Desde el comienzo han sido objeto de numerosas investigaciones, especialmente por las peculiares características que se derivan del contacto entre materiales tan diversos como la pared del silo y el material almacenado. Desde finales del siglo XIX hasta mediados del siglo XX se desarrollaron numerosos trabajos experimentales con objeto de conocer las distribuciones de presiones en los silos (Ayuga et al., 2005). Por otro lado, el gran desarrollo en la capacidad de cálculo de los ordenadores que se ha producido desde finales del siglo XX hasta la actualidad ha propiciado un gran número de trabajos en los que se estudian los silos mediante el empleo de métodos numéricos (Jofriet et al., 1977; Eibl and Häussler, 1984; Ooi and Rotter, 1990; Guaita et al., 2003; Gallego et al., 2010; González-Montellano et al., 2012).

Esta profusión de estudios ha permitido incrementar significativamente el conocimiento acerca del comportamiento del silo y los distintos elementos que lo conforman. Sin embargo, esto no ha impedido la existencia de numerosos fenómenos que pueden provocar fallos de silos como “silo quaking (vibraciones en el silo)” (Wensrich 2002), “silo honking (música en el silo)” (Wilde et al., 2010), pandeo (Iwicki et al., 2011), o la aparición de explosiones de silos (Piskoty et al., 2005) o roturas producidas por fenómenos diversos como por ejemplo vaciados excéntricos o efectos térmicos (Blight, 2006). Como consecuencia, actualmente siguen realizándose ensayos experimentales en silos a escala real para conocer con mayor profundidad las causas que producen fallos estructurales (Nielsen, 1972; Brown et al., 2000; Ramirez et al., 2010; Couto et al., 2013).

Los materiales empleados en la construcción de las paredes de silos son actualmente en su mayoría el hormigón armado y el acero, siendo éste último el material más usado en Europa. En cuanto a las tipologías de silos de acero, éstos suelen poseer una pared cilíndrica con fondo plano, aunque en ocasiones también se emplea una tolva de descarga. En ambos casos, en la parte superior del cuerpo cilíndrico se dispone una estructura troncocónica como techo del silo, que a su vez sirve para soportar las pasarelas dispuestas en coronación que permiten inspeccionar el silo desde arriba y trasladarse de un silo a otro cuando se diseñan baterías de silos (Figura 1).



Figura 1. Batería de silos metálicos con techo troncocónico y pasarela para inspección

El presente trabajo se centra en diseñar un procedimiento de ensayo para estudiar las tensiones y los desplazamientos verticales existentes en un techo de silo metálico de 18,33 m de diámetro, sometido a diferentes estados de carga. Con ello, se pretende la validación de los modelos tridimensionales de cálculo matricial de estructuras desarrollados por la empresa SYMAGA S.A. para el diseño de sus techos para silos. La realización de los ensayos experimentales permite además estudiar el comportamiento real del techo de silos cilíndricos frente a estados de carga gravitatoria, de manera que puedan identificarse posibles problemas o anomalías que no reflejen los modelos de cálculo.

2. Material y métodos

2.1 Instrumentación del ensayo

El ensayo consiste en la aplicación progresiva de cargas en diversos puntos del techo de un silo metálico de 18,33 m de diámetro, con 24 vigas radiales, según el diseño comercial de la empresa SYMAGA S.A., ejecutado por esa misma empresa en sus instalaciones de Villarta de San Juan (Ciudad Real). La aplicación de las cargas se ha realizado con cintas tensoras con tensión controlada (Figura 2a), de manera progresiva con incrementos aproximados de 1 kN en cada paso de carga en 54 puntos de carga (Figura 2b). Para determinar el valor de las cargas aplicadas sobre la estructura se han utilizado 8 medidores de fuerza colocados en las vigas 1, 5, 9, 13, 17 y 21. Éstos se corresponden con tres tipos de equipos diferentes: un dinamómetro con célula dinamométrica externa, una precisión $\pm 0,05\%$ y un límite de medición de 20kN; 5 ganchos de pesaje del modelo Gram-CSX-1T con capacidad de medición hasta 10kN y resolución de 2N; 2 ganchos de pesaje del modelo Baxtran-STC, con capacidad de medición de 10kN y resolución de 5N.

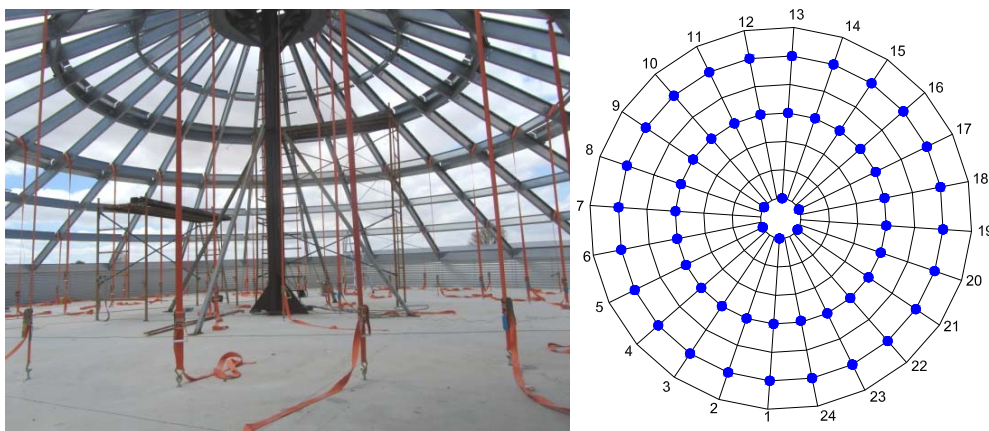


Figura 2. a) Estructura de techo de silo de acero ensayada b) Puntos de aplicación de cargas

Los desplazamientos verticales de la estructura se midieron con 3 sensores de desplazamiento por hilo del fabricante alemán ASM, con un rango de medición de 0 a 100 mm y una resolución de $\pm 0,025$ mm, que se instalaron en la cúpula del techo y las vigas radiales 1 y 13. Este tipo de sensor transforma el movimiento lineal de un cable en un movimiento angular mediante un tambor, que es recogido y convertido en una señal eléctrica a través de un potenciómetro. Así, el valor del desplazamiento se estima a partir la señal eléctrica captada, transmitida a un datalogger y posteriormente interpretada. Para transmitir el desplazamiento vertical de las vigas al sensor se utilizaron cables especiales de acero flexible de 0,4mm de diámetro. El desplazamiento horizontal, medido según la dirección radial, de los nudos inferiores de las vigas radiales fue realizada mediante el uso de 4 comparadores de precisión en los puntos de enlace entre la pared del silo y cuatro vigas radiales uniformemente distribuidas (1, 7, 13 y 19). Todos los comparadores empleados poseían una precisión mayor a 0,01 mm.

Por último, se instalaron 8 grupos de galgas extensométricas en cuatro vigas opuestas de la estructura (4, 10, 16 y 22) para registrar las tensiones producidas en las vigas radiales de la estructura. En cada

punto de medida se dispusieron longitudinalmente dos galgas extensométricas, una en el ala superior y otra en el ala inferior del perfil, para determinar las tensiones de tracción o compresión existentes en dichas secciones según la dirección longitudinal de la viga. Las galgas extensométricas utilizadas fueron del tipo lineal, con una rejilla de 350 ohmios de resistencia. Su colocación sobre el perfil de la estructura requirió una preparación previa de la superficie, que implicó el lijado de la zona y su limpieza con acetona. El pegado de las galgas extensométricas se realizó utilizando un adhesivo de tipo cianocrilato.

2.2 Modelo de cálculo

Se desarrolló un modelo tridimensional de la estructura de barras con el programa PowerFrame de la empresa BuildSoft. Los elementos principales del modelo consisten en:

- Vigas radiales, formadas por perfiles tipo Sigma de 250 mm de altura y 3 mm de espesor. Son los elementos principales de la estructura de soporte del techo del silo, y reciben directamente las cargas actuantes sobre el techo.
- Vigas circunferenciales, formadas por perfiles tipo Sigma de 250 mm de altura y 3 mm de espesor. Son elementos unidos mediante tornillos, únicamente a través del alma, a las vigas radiales, por lo que dicha unión se ha considerado articulada. Su principal función consiste en arriostrar las vigas radiales.
- Anillo de rigidización superior, constituido por un perfil UPM-300. En la cúpula del techo se ha dispuesto este elemento circunferencial para unir rigidamente entre sí todas las terminaciones de las vigas radiales, formando una zona de elevada rigidez.
- Tirante de unión de todas las vigas radiales en su zona inferior, en la unión con las virolas de la pared, constituido por un redondo de acero de sección reducida.

En lo que respecta a las coacciones del modelo, únicamente se ha impedido el desplazamiento y el giro en la dirección vertical de los nudos inferiores de apoyo de las vigas radiales. Se han considerado articuladas las uniones de las vigas radiales con las vigas circunferenciales, y con el tirante inferior. Por otro lado, la unión entre las vigas radiales y el collar superior se ha considerado rígida..

3. Resultados y discusión

La figura 3 muestra los valores de tensión obtenidos en la repetición E1 para la sección G1 de cada una de las cuatro vigas radiales (R1, R2, R3 y R4) y para las dos posiciones (T, Top; B, Bottom) posibles de la galga extensométrica. De igual forma, también se muestra la predicción realizada con el modelo de cálculo modificado en el tirante para una posición análoga a la considerada en el ensayo. Los resultados del modelo no aluden a una viga radial concreta puesto que el ensayo de carga analizado era simétrico, por lo que la respuesta de todas las vigas radiales es idéntica. Se puede observar que la curva de resultados proporcionada por el modelo de cálculo reproduce fielmente los resultados alcanzados en los ensayos experimentales, y el rango de tensiones es similar. Todas las vigas radiales presentan una tensión normal de compresión en el ala superior, y de tracción en el ala inferior. Además, la magnitud de la tensión normal de tracción en el ala inferior es siempre inferior, para un mismo tiempo t , a la correspondiente a la tensión normal de compresión presente en el ala superior de la misma sección, lo que implica la existencia de un momento flector positivo y una tensión normal de compresión.

Dada un ala del perfil (T, top; B, bottom) y un instante t , se aprecia que hay ciertas diferencias en las tensiones normales observadas en las cuatro vigas radiales. Esta discrepancia se debe a que la fuerza aplicada en cada uno de los 48 puntos de carga no es exactamente igual, algo que tiene su explicación en las características del procedimiento de aplicación de cargas seguido y en las lógicas dificultades que conlleva la realización de un ensayo real. Esta heterogeneidad de las cargas aplicadas en el techo

es la responsable de las desviaciones observadas de tensión normal entre puntos análogos de vigas radiales diferentes. Aun así, las diferencias no son excesivas entre la máxima y mínima tensión, y se sitúan siempre en valores inferiores al 20%.

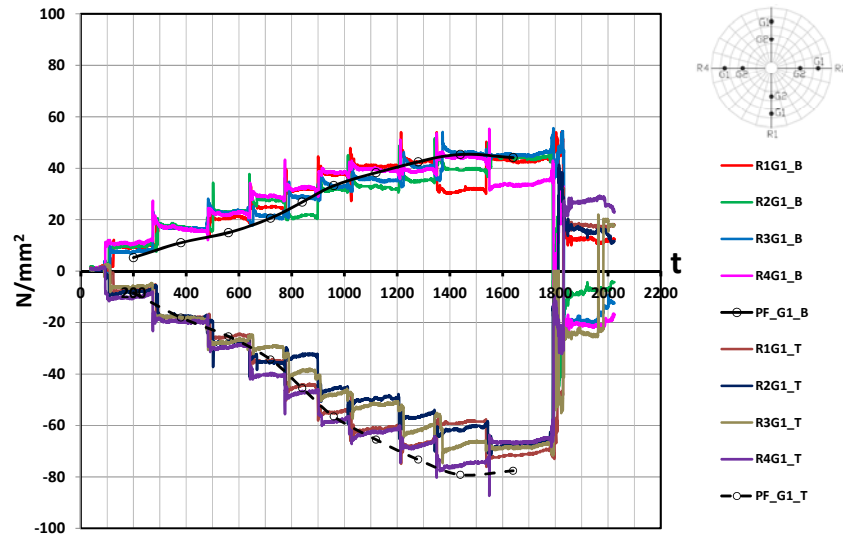


Figura 3. Comparación a lo largo del tiempo del ensayo (t, en s) entre las tensiones normales medidas experimentalmente y las obtenidas con el modelo de cálculo (PF) para todas las vigas radiales (R) en la posición G1 de la repetición E1, tanto en la cara superior (T) como inferior (B) de la viga

Cada nuevo paso de carga se identifica fácilmente en las curvas correspondientes a las tensiones medidas a partir de los escalones o cambios instantáneos de tensión representados en dichas curvas. En cada escalón, se observa un pico inicial en la tensión registrada en el ensayo, que se debe a la mayor carga ejercida de forma transitoria por las eslingas empleadas en el ensayo durante la maniobra de tensado de las mismas. No obstante, esta tensión disminuye ligeramente al cabo de un cierto tiempo cuando se completa la maniobra de tensado, y se estabiliza en torno a un valor constante.

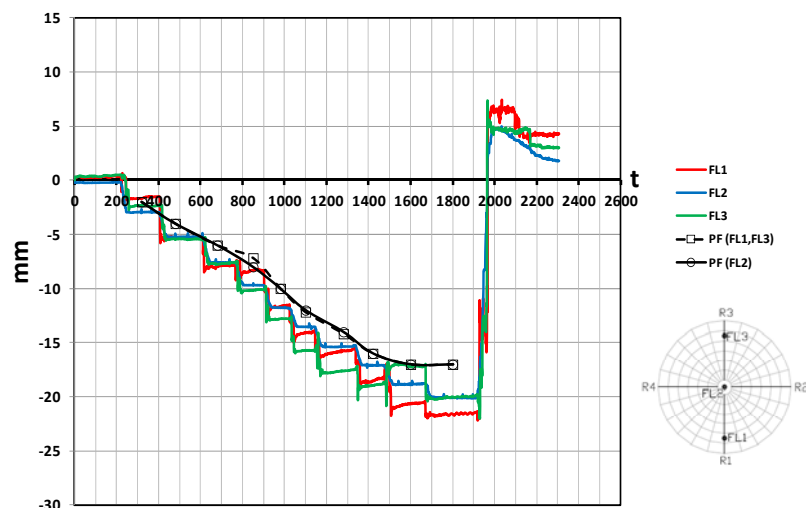


Figura 4. Comparación entre los desplazamientos verticales medidos experimentalmente (FL) y los obtenidos con el modelo de cálculo (PF) en la repetición E1, a lo largo del tiempo de ensayo (t, en s).

La figura 4 muestra los valores de desplazamiento vertical obtenidos en la repetición E1 para cada flexímetro, y los valores predichos por el modelo de cálculo para las mismas posiciones. La curva de resultados proporcionada por el modelo de cálculo reproduce los resultados alcanzados en los ensayos experimentales. Además, los valores calculados con el modelo de cálculo se sitúan en el rango de

magnitud de los desplazamientos medidos. Las ligeras discrepancias obtenidas en las medidas registradas por los flexímetros se deben a las ligeras variaciones en la fuerza aplicada en cada uno de los 54 puntos de carga. Aun así, las diferencias entre los desplazamientos máximo y mínimo registrados por los tres flexímetros instalados no son excesivamente grandes.

4. Conclusiones

El ensayo de carga diseñado permite estudiar el comportamiento real de techos de silos cilíndricos de gran diámetro, de manera que se pueden detectar problemas y anomalías que no recogen los modelos de cálculo. El modelo de cálculo de la estructura, proporciona resultados que concuerdan con los obtenidos en los ensayos, en el caso de las tensiones máximas correspondientes a la viga radial, y los desplazamientos del techo.

Bibliografía

- Ayuga, F., Aguado, P., Gallego, E., and Ramírez, A. (2005). New steps towards the knowledge of silos behaviour. *International Agrophysics* **19**, 7–17
- Blight, G. (2006). Assessing load on silos and other bulk storage structures. Research applied to practice. Taylor & Francis Group, London.
- Brown, C. J., Lahlouh, E. H., and Rotter, J. M. (2000). Experiments on a square planform steel silo. *Chemical Engineering Science* **55**, 4399 – 4413.
- Couto, A., Ruiz, A., and Aguado, P.J. (2013). Experimental study of the pressures exerted by wheat stored in slender cylindrical silos, varying the flow rate of material during discharge. Comparison with Eurocode 1. Part 4. *Powder Technology* **237**, 450 – 467.
- Eibl, J., and Haüssler, U. (1984). Numerical investigations in discharging silos. *Journal of Engineering Mechanics* **110** (6), 957-971.
- Gallego, E., Rombach, G. A., Neumann, F., and Ayuga, F. (2010). Simulations of granular flow in silos with different finite element programs: ANSYS vs. SILO. *Transactions of the ASABE* **53** (3), 819-829.
- González-Montellano, C., Gallego, E., Ramírez-Gómez, A., and Ayuga, F. (2012). Three dimensional discrete element models for simulating the filling and emptying of silos: Analysis of numerical results. *Computers and Chemical Engineering* **40**, 22 – 32.
- Guaita, M., Couto, A., and Ayuga, F. (2003). Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. *Biosystems Engineering* **85** (1), 101-109.
- Iwicki, P., Wójcik, M., and Tejchman, J. (2011). Failure of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns and repair methods using a sensitivity analysis. *Engineering Failure Analysis* **18**, 2064 – 2083.
- Jofriet, J. C., Lelievre, B., and Fwa, T. F. (1977). Friction model for finite element analyses of silos. *Transactions of the ASAE* **20** (4), 735-744.
- Nielsen, J. (1972). Silotryk (pressures in silos). Ph.D. thesis. Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering, Lyngby.
- Ooi, J. Y., and Rotter, J. M. (1990). Wall pressures in squat steel silos from simple finite element analysis. *Computers and Structures* **37** (4), 361-374.
- Piskoty, G., Michel, S.A., and Zraggen, M. (2005). Bursting of a corn silo – An interdisciplinary failure analysis. *Engineering Failure Analysis* **12**, 915 – 929.
- Ramirez, A., Nielsen, J., and Ayuga, F. 2010. Pressure measurements in steel silos with eccentric hoppers. *Powder Technology* **201**, 7 – 20.
- Wensrich, C. (2002). Selected case studies on the silo quacking problem. *Bulk Solids Handling* **22**, 117–22.
- Wilde, K., Tejchman, J., Rucka, M., and Niedostatkiwicz, M. (2010). Experimental and theoretical investigations of silo music. *Powder Technology* **198**, 38 – 48.